

损的位置和程度。

同时，根据检测目的、场景选择合适的检测方法：新建高速公路竣工验收时，采用动态摩擦测试法（多速度梯度）、激光构造深度仪法，对整个路面抗滑性能的均匀性、稳定性进行评价；雨天事故多发路段专项检测时采用动态摩擦测试法，模拟不同车速、湿度条件下抗滑性能，为养护改造提供针对性数据；资金较紧张的基层养护单位采用“摆式

摩擦系数测定法+手工铺砂法”组合方式满足基本检测需求。此外，可以将人工智能算法嵌入到组合检测模式里，用以前的检测数据进行机器学习，建立路面抗滑性能预测模型，提前预知风险路段。同时，加强不同的检测方法数据的相互校对，创建多维度的评价体系，将动态检测得到的宏观数据同静态检测的微观数据融合起来，从而产生可视化抗滑性能热力图，为养护决策赋予更加直观的参照。

表 1 主流抗滑性能检测方法综合对比

检测方法	核心优势	主要局限	适用场景
摆式摩擦系数测定法	操作简单、成本低廉、设备便携	静态检测、精度低、效率低、人为误差大	局部排查、室内试验、无需刻槽的水泥路面、低速交通区
动态摩擦测试法	动态模拟、精度高、效率高、连续检测	设备成本高、技术门槛高、受平整度影响	高速公路全路段检测、精细化评价
手工铺砂法	操作简单、成本极低、无需复杂设备	精度低、效率低、人为误差大、无法连续检测	局部检测、基层养护、应急排查
激光构造深度仪法	精度高、效率高、连续检测、自动化程度高	设备成本高、受污染物影响、光照敏感	高速公路全路段检测、大数据分析

4.2 检测设备技术升级

改善设备核心部件的性能：就动态摩擦测试法来说，改进测试轮的悬挂系统，采取自适应减震技术，确保法向压力稳定；针对激光构造深度仪，改良激光传感器的信号处理算法，加强抗干扰性能，削减光照、污染物对检测精确度的影响；对摆式摩擦系数测定仪的橡胶片材质加以改进，运用更接近实际轮胎的耐磨、抗老化材料，从而增长使用寿命并改善测试结果的相关性。通过这些优化措施，能够显著提升检测设备在复杂环境下的适应性与准确性。

推进设备集成化、智能化：研发可同时检测摩擦系数、构造深度、平整度等多个指标的集成检测设备，一次检测得到多个数据；采用 GPS 定位技术、无线传输技术，实现检测数据实时上传；利用云端大数据分析平台，对路面抗滑性能实施动态监测、预警；增添设备自动校准功能，减小人为操作造成的误差，确保检测结果精准。最终构建起智能化、高效化的路面抗滑性能检测体系，为高速公路安全运营提供有力保障。

4.3 检测流程规范化

制定统一的检测标准：对每一个检测方法的操作流程、设备参数、环境要求、数据处理方式等进行规定，以消除由于操作不规范导致的检测偏差。例如规定动态摩擦测试法的测试速度梯度为 20km/h、40km/h、60km/h，法向压力为 200N±10N；明确激光构造深度仪检测间距不大于 5m、路面清理要求无明显污染物、积水等。

加强检测人员培训：建立专业的检测人员培训体系，包含设备操作、数据处理、误差分析等内容，使检测人员掌握好各个方法的要点和注意事项；定期开展技能考核、比对试验，提升检测人员的综合素质以及规范性操作能力，降低

人为因素给检测结果造成的影响。

完善质量控制体系：检测之前对设备进行全面校准，确保仪器性能满足检测要求；检测过程中设置平行样检测（每公里不少于 3 个平行样），检验数据的重复性；检测之后对数据进行异常值剔除和合理性分析，结合路面实际状况（破损、积水等）修正检测结果，确保数据的真实性、有效性。

5 结语

高速公路沥青路面抗滑性能检测关系到行车安全，不同的检测方法各有优劣：摆式摩擦系数测定法、手工铺砂法适用于局部排查和基层养护，精度和效率较低；动态摩擦测试法、激光构造深度仪法虽然符合全路段精细化检测的要求，但是设备成本较高、技术门槛较高。采用检测方法组合优化、设备技术优化、检测流程标准化的三维策略，提高检测的精度、效率和可靠性。未来可利用人工智能、大数据等技术推进智能化发展，建设动态评价与预测模型，为养护决策提供科学依据。

参考文献

[1] 宋丽萍.高速公路沥青路面抗滑性能分析[J].交通企业管理, 2025,40(04):107-109.

[2] 韩凯.高速公路路面抗滑表层施工技术 & 施工质量管理[J].四川建材,2024,50(07):65-67.

[3] 郝文斌.高速公路沥青路面使用性能指标相关性分析[J].山西交通科技,2024,(05):86-90.

[4] 樊向阳,曹林辉,陶斯和,等.高速公路沥青路面运营早期抗滑性复测指标竣工评定标准[J].公路,2024,69(10):29-36.

[5] 蒋建飞,赵跃,郭阳阳,等.高强韧抗滑磨耗层在高速公路沥青路面养护中的应用[J].交通节能与环保,2025,21(01):180-184.

Safety Management and Risk Control of Aircraft Maintenance Operations

Danpeng Zhu

Maintenance Engineering Department of Beijing Airlines Co., Ltd., Beijing, 100076, China

Abstract

In response to the challenges of maintenance safety in the context of the rapid increase in global air transportation volume, this article will combine the characteristics of aviation maintenance accidents and the practical application of AI technology to construct a safety management system with intelligent prevention, resilience guarantee, and closed-loop control. By relying on innovative measures such as integrated AI fault diagnosis, regional supply chain, and digital twin training, the proactive interception rate of faults has been significantly improved, and the occurrence rate of human errors has been reduced. And rely on actual cases to verify the feasibility and effectiveness of relevant security management measures and risk control paths. According to research results, the integrated strategy of integrating digital technology and resilience management can break through the bottleneck of traditional maintenance safety and provide reference for the aviation industry to achieve the goal of “zero deaths”.

Keywords

aircraft maintenance operations; Safety management; digital twin risk control

航空器维修作业的安全管理与风险控制

朱丹鹏

北京航空有限责任公司机务工程部，中国·北京 100076

摘要

为应对全球航空运输量激增背景下的维修安全挑战，文章将结合航空维修事故特征以及AI技术应用实践，构建智能预防、韧性保障、闭环控制的安全管理体系。依靠集成AI故障诊断、区域化供应链、数字孪生培训等创新措施，大幅提升故障主动拦截率，降低人为差错发生率。并依靠实际案例，验证相关安全管理措施与风险控制路径的可行性与有效性。根据研究结果显示，融合数字化技术、韧性管理的一体化策略，可破解传统维修安全瓶颈，为航空业实现“零死亡”目标提供参考依据。

关键词

航空器维修作业；安全管理；数字孪生；风险控制

1 引言

航空器是集成航空电子、动力系统等多领域技术的运载工具，具有人员运输、物流配送等功能，是全球交通网络的关键枢纽。但由于航空器的精密化程度较高、系统关联性强，随着新型技术的高度普及，传统经验型维修策略已逐渐无法适配。而维修安全关乎飞行安全，一旦因操作疏漏、故障误判引发事故，不仅会造成重大生命财产损失，还会破坏航空业公信力。为此，文章将全面梳理维修难点、构建高效的的安全管理与风险控制体系。

2 航空器维修作业的安全管理与风险控制必要性分析

航空器的安全运行离不开各系统的协同工作，它对可靠性与安全性有极致要求。而航空器维修作业则是依据“航空器维修单位合格审定规定”，对航空器及部件开展的维护、检修、检测与故障修复工作，核心内容包括：航线维修，包括航班间隙的快速检查与小故障排除；基地维修，定期深度检修，进行机身腐蚀处理、发动机拆换；部件维修，是指对航电设备、起落架等关键部件的专业修复。

之所以要开展航空器维修的安全管理与风险控制工作，根源在于若维修中存在疏漏，比如部件安装偏差、故障误判，很可能引发动机失效、起落架故障等致命问题，严重危及机上人员生命，并造成巨额财产损失。且航空器技术复杂度高、维修场景多样，本身存在多重风险点，唯有通过系统的安全管理与风险控制，才能筑牢飞行安全防线。

【作者简介】朱丹鹏（1986-），男，中国北京人，本科，助理工程师，从事民用航空器维修维护与定检放行研究。

3 航空器维修作业安全管理创新措施

3.1 构建智能预防型维修体系

3.1.1 AI 驱动的故障诊断与预警系统

航空企业可引入重复故障自动化识别系统,设计智能故障筛查程序,基于 BERT 预训练模型与余弦相似度算法,优先整合过去几年维修记录,将其集中存储在数据库以及云服务器,形成故障语料库。之后对新故障报文进行分词、词性标注,提取故障现象、部件、处置方案等特征。通过系统自动计算与语料库中历史故障的相似度,从专家库中匹配最优解决方案。

同时,航空企业还可积极参考其他企业的成功案例,比如借鉴苏南瑞丽航空经验,在飞机状态监控系统中嵌入 Deep Seek 维修知识库,实现告警、解读、方案闭环。当系统发出告警,比如液压系统压力低时,系统可在 10 秒内解析告警代码对应的故障部位,比如液压泵 A,调取该部件的历史故障频率,再推送标准化处置流程,含工具清单、操作视频,以此缩短故障响应时间,降低紧急故障处置延误率。

3.1.2 数字孪生维修模拟与验证

为更好地应对极端环境下的维修挑战,航空企业可搭建覆盖主流机型的数字孪生平台,通过 Unity3D 引擎还原高温(50℃)、高海拔(4500 米)等极端场景,维修人员通过佩戴 VR 设备进行沉浸式操作训练,比如高原机场发动机拆装等。并进一步结合 Graph RAG 技术构建安全信息知识图谱,将故障数据转化为关联图谱,比如起落架轴承磨损→液压系统压力下降→刹车失效,通过图神经网络挖掘隐含关联,提前预判连锁风险。最后,还要在数字孪生平台中模拟维修方案的执行效果,比如针对发动机燃烧室积碳问题,可在虚拟环境中测试高压气吹+化学清洗或是激光除碳两种方案的实际效果,对比积碳清除率、部件损伤风险等指标,选择最优方案落地。

3.1.3 量子传感实时监测网络

航空企业可提前部署量子传感网络,旨在针对发动机叶片、机身结构等关键部位,实现毫米级精度监测。量子传感器可通过检测量子态变化,捕捉部件振动频率、应力分布的微小异常,将检测结果经 5G 专网实时传输至地面中心,系统能提前 140 小时预警失效风险。

3.2 打造韧性供应链安全保障

3.2.1 区域化供应链重构与布局

航空企业要尽快推行关键部件的本地化生产,参考波音、空客“三地 3D 打印中心”模式,创建关键部件 3D 打印基地,聚焦发动机核心机匣、起落架轴承等易断供部件,采用钛合金粉末床熔融技术,实现 72 小时快速生产与供应。结合备件储备库,由航司总部储备高频更换部件,比如密封圈、滤芯,区域中心储备关键部件,比如发动机模块、起落架。并搭配 SAP 库存管理系统,动态监控库存,自动触发补货,

以此降低航空企业的备件短缺率。

3.2.2 区块链溯源与备件共享机制

在做好区域化供应链布局的基础上,航空企业还要设置全生命周期区块链溯源机制,积极开发区块链平台,将维修备件的生产、运输、维修全流程数据上链,保证数据不可篡改且实时可查。乘客可依靠航空公司 APP 输入航班号,查询该飞机发动机、起落架等关键部件的检测记录,提升安全信任度,而监管部门可通过平台追溯问题备件流向,避免因安全问题引发的飞机停场^[1]。

3.3 强化人员能力与安全文化建设

一方面,航空企业要致力于开发覆盖核心维修场景的 VR 培训系统,包括发动机拆装、液压系统调试等,借助触觉反馈设备,模拟螺栓拧紧力矩、部件重量触感,还原真实维修环境中的物理阻力,以此提高人员专业能力的培训效果。并将维修手册拆解成海量知识点,关联故障案例、操作视频。使维修人员在现场作业时,可直接通过 AR 眼镜扫描部件,系统会自动推送该部件的维修要点,比如润滑脂型号、安装间隙标准。

另一方面要保证安全责任与激励机制落地,企业应建立维修人员电子诚信档案,记录关键部件维修的操作时间、使用工具、签字确认记录,与个人资质等级、晋升通道直接挂钩。若某部件在设计寿命内发生非意外故障,可追溯至初始维修人员,对违规操作实行“资质降级+专项培训”处罚,对连续 5 年无差错人员,则提供薪资上浮、优先参与新技术研发等激励。鼓励维修人员上报隐性风险与改进建议,对被采纳的建议,按经济效益给予 500-50000 元奖励。

3.4 完善全流程应急响应机制

航空企业需设计分级应急处置体系,按故障影响范围与严重程度,将维修应急事件划分:一般事件,单一部件故障,比如客舱照明失效,此类事件不影响飞行安全,处置时限 24 小时内;重大事件,表现为关键系统故障,比如液压系统泄漏,需停场维修,处置时限 6 小时内;特别重大事件,核心部件失效,比如发动机叶片断裂,可能引发事故,处置时限 1 小时内。

4 航空器维修作业风险控制闭环路径

4.1 风险识别

航空企业可基于人为因素分析与分类系统、故障模式与影响分析机制,构建风险清单,并建立季度更新机制。之后依靠空-地-人三位一体数据采集网络,通过飞机快速存取记录器系统,采集飞行参数,包括发动机 EGT 温度、起落架收放压力等,并将采集结果传输告警报文。结合维修场地部署的智能监测传感器、环境传感器,确保数据可通过边缘计算节点实时上传。由维修人员通过 AR 眼镜记录操作过程,配备智能手环采集心率、步数等生理数据,分析工作负荷与疲劳程度,以此识别人为操作风险^[2]。